

## 研究活動 ? . 原子核実験グループ

雑誌名	年次研究報告
巻	2017
ページ	132-158
発行年	2018-09
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2241/00153478">http://hdl.handle.net/2241/00153478</a>

## VI. 原子核実験グループ

教授	三明康郎、小沢顕
准教授	江角晋一、笹公和
講師	中條達也
助教	Oliver Busch、坂井真吾、森口哲朗、鈴木伸司
研究員	渡辺 陽介、松中 哲也
技官	加藤純雄
大学院生	福岡翔太 (D3)、木村創大 (D3)、向井もも (D3)、田中直斗 (D3)、横山広樹 (D3)、 野中俊宏 (D3)、細川律也 (D3)、新井郁也 (D2)、Murad Ahmed(D2)、青山遼 (D2)、 杉浦哲郎 (D2)、金秉徹 (D1)、天野将道 (M2)、黒尾奈未 (M2)、細谷青児 (M2)、 佐藤一輝 (M2)、レバザ義美 (M2)、上岡大起 (M1)、高野健太 (M1)、市沢太地 (M1)、 加藤浩樹 (M1)、川名大地 (M1)、川村陽太 (M1)、鈴木刀真 (M1)、中川和也 (M1)
卒業研究生	落合悠太、齋藤大士、高村匡広、田所賢一、中川果南、畠山みな、星有輝子

### 【1】低エネルギー原子核実験グループ

(小沢顕、笹公和、森口哲朗、鈴木伸司)

#### (1) 稀少 RI リング

稀少 RI リング (R3) は、約 10 年間の開発研究の末、平成 27 年 3 月に完成した。平成 29 年度は 4 回目のコミッショニング実験を行った。平成 29 年度は、入射ラインの一部として利用している SHARAQ 上流に OEDO が導入され、入射ラインの磁石の配置が一部変更されたとともに、ビーム光学が変更された。一方、これまでのコミッショニング実験では、R3 への入射効率が、設計値より 1 桁以上小さい (約 0.14%) ことが問題であった。今回の入射ラインの変更に伴い、R3 へのビーム光学計算を再検討し、入射効率の改善を図った。実験セットアップおよび RI ビームを発生する BigRIPS の設定等は、平成 28 年度に行なった第 3 回コミッショニング実験とほぼ同じである。238U の一次ビームから核分裂破砕片として、78Ge 周辺の不安定核を生成した。生成直後に、エネルギー吸収板により、不安定核を約 180 A MeV まで減速させた。新しいビーム光学により、78Ge の入射効率を測定したところ、入射効率は、約 1.9% となり、以前より 1 桁以上改善されたとともに、ほぼ設計値の入射効率を得ることができた。今後は、この新しいビーム光学により質量測定を行う予定である。平成 29 年 10 月には、重元素合成過程解明に関連して、R3 による Sn の領域の質量測定のプロポーザルを理研 RI ビームファクトリーに提出した。プロポーザルは、12 月の PAC で審査され、採択された。平成 30 年度の秋以降に質量測定実験を行う予定である。

#### (2) 偏極陽子ビームによる不安定核の生成

我々は、不安定核の核モーメント測定を目標として、偏極陽子ビームによる核偏極した不安定核の生成を試みている。平成 29 年度は、平成 28 年 3 月から供用が開始された 6MV タンデム加速器で実験を行なった。不安定核の核モーメント測定は、不安定核からのベータ線の非対称放出を利用した核磁気共鳴法 (ベータ NMR) により行う。我々は、6MV タンデムの A6 コースに、ベータ NMR の実験装置

( 静磁場、高周波磁場、ベータ線検出器などから構成 ) を設置し、実験を行なった。まずは、我々のベータ NMR 装置のシステムチェックとして、先行研究において、核偏極生成が確認されている偏極陽子 12MeV と Si 標的の系で実験を始めた。この系では、(p,n) 反応、(p, $\alpha$ ) 反応により、それぞれ不安定核 29P ( $T_{1/2}=4.2s$ ) と 25Al ( $T_{1/2}=7.2s$ ) が生成される。これらの不安定核の核磁気モーメントは既知である。6MV タンデム加速器により 12 MeV に加速された偏極陽子ビームを、A6 コースのベータ NMR の実験装置内に設置した厚さ 0.5mm の Si 標的に照射した。偏極陽子ビーム ( 偏極度、約 70%、ビーム強度、約 20 nA ) を 10 秒間照射後、 $\beta$  線の時間スペクトルを観測し、29P、25Al および 30P ( $T_{1/2}=150s$ ) の生成を確認した。生成した不安定核の核偏極量は、標的の上下に置いたベータ線検出器の非対称度から推定できる。今回の測定結果は、約 0.7% の非対称度を示した。この非対称度は、先行研究の結果と同程度である。先行研究と同程度の核偏極生成が確認できたので、今後は、29P および 25Al に対して核磁気共鳴を行い、我々のベータ NMR 実験装置のシステムチェックを進める。

### (3) KISS の研究・開発状況

KEK Isotope Separation System ( KISS ) では、r-過程の解明に重要な中性子数  $N = 126$  近傍の原子核の性質を多角的に調べるため、ガスジェット内レーザー共鳴イオン化核分光装置 ( 超微細構造測定 )、低バックグラウンドかつ高効率な - 核分光測定系、多重反射型飛行時間測定式質量分析器 ( MR-TOF-MS ) ( 精密質量測定 ) の開発を行っている。

【中性子過剰 Os 同位体の - 核分光】 2017 年度には、198 Pt 回転標的と 136 Xe ビームを用いて 195 - 198 Os ( $Z = 76, N = 119 - 122$ ) を生成し、レーザー共鳴イオン化により元素選択的にイオン源から引き出した後、新たに開発した低バックグラウンド複数分割型比例係数ガス検出器 ( MSPGC ) と高立体角なクローバー型 線検出器 ( SCGe ) で構成される検出器系で精密な - 核分光を行った。これにより、198 Os の 崩壊半減期 125(28) s を初めて測定することに成功した。また、多重度を考慮した MSPGC のイベントと同時測定した、線のエネルギースペクトル及び崩壊寿命測定から 195 Os の長寿命な準安定状態を発見した。基底状態からの 崩壊遅延 線も含めた、より詳細な解析が進行中である。

【線検出器の改良】 希少核種のより精密な 崩壊核分光のために、MSPGC の 3 次元位置読み出し化の開発を行っている。比例係数管の陽極線を BeCu 線から高抵抗な炭素線に変更し、両端から読みだされる電荷量の解析から 3 mm の位置分解能が得られた。オンライン実験に向けて本番機での性能試験が進行中である。

【ガスジェット内レーザー共鳴イオン化核分光】 原子核の電磁モーメントの精密測定に向けて、ガスジェット内レーザー共鳴イオン化核分光系を開発中である。速度の均一なガスジェット生成のためのラバルノズル、コリニアレーザー分光のために必要なイオン輸送装置である S 型 RFQ、高分解能なレーザー分光のための狭線幅ダイオードレーザー等を導入した。2018 年度より、本格的な性能試験を行う予定である。

【質量測定系の開発】 KISS から引き出した希少核種の精密質量測定のために MR-TOF を導入している。2017 年度には、- 核分光と両立するための二次ビームスイッチング偏向電極と、MR-TOF 入射のための二次ビーム再熱化用 He ガスセルを導入した。今後、MR-TOF へのイオンの導入に必要なイオントラップとバンチャー系を設置する予定である。

### (4) 5480 BC 宇宙線イベントの原因究明に向けた長寿命放射性核種 $^{36}\text{Cl}$ の AMS 試験測定

5480BC 周辺で、宇宙線フラックスの増加が単年年輪中の  $^{14}\text{C}$  (半減期  $T_{1/2} = 5,730 \text{ yr}$ ) 測定によって観測された。しかしその原因については大規模な太陽プロトン爆発現象の可能性が指摘されているが、詳細は不明である。同じ宇宙線生成核種である  $^{36}\text{Cl}$  は、銀河宇宙線や太陽宇宙線などと地球大気の構成成分との相互作用により生成される放射性核種であり、大気中の生成過程や輸送過程が  $^{14}\text{C}$  とは異なる。 $^{36}\text{Cl}$  生成率は地球に入射する宇宙線の強度に依存して変化するため、海底堆積物やアイスコアに蓄積した  $^{36}\text{Cl}$  フラックスの変動から過去の宇宙線強度の変動を復元することができる。そこで南極ドームふじで掘削されたアイスコア中の  $^{36}\text{Cl}$  について加速器質量分析 (AMS) による測定を行い、5480 BC 周辺の宇宙線フラックスの変動について調査した。 $^{36}\text{Cl}$  の AMS 測定では同重体の  $^{36}\text{S}$  が重大な妨害核種になる。そこで、同重体の  $^{36}\text{S}$  を抑制するために AgBr を用いたバックングを行った。またこの AgBr について、 $^{36}\text{S}$  の混入が少ない作製方法を検討し、市販試薬の AgBr と比較を行った。その結果、 $^{36}\text{S}$  の混入量が少ない AgBr を得ることに成功し、検出限界は  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl} \sim 3 \times 10^{-15}$  を達成することができた。この AgBr をバックング材として用いて南極ドームふじアイスコア中の  $^{36}\text{Cl}$  について AMS 試験測定を行い、宇宙線フラックスの変動について調査した。図 1 に南極ドームふじアイスコア中の 5480BC 付近の  $^{36}\text{Cl}$  濃度変動の測定結果を示す。5480BC 付近に  $^{36}\text{Cl}$  濃度の増大ピークが認められるが、今回測定を行ったサンプルでは時間分解能が不十分であった。今後は、より高時間分解能を持つサンプルを用いた測定を検討する予定である

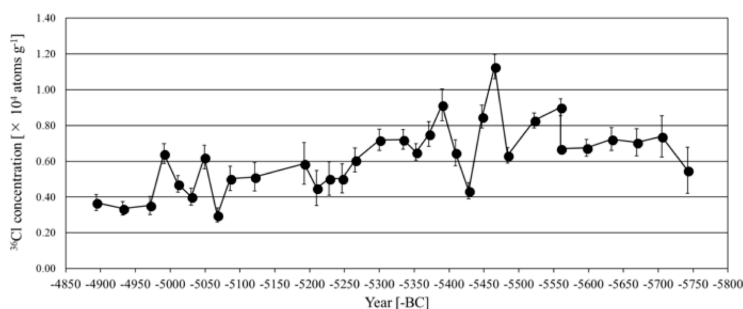


図 1 南極ドームふじアイスコア中の 5480BC 付近の  $^{36}\text{Cl}$  濃度の測定結果

#### (5) 構造材料計測用マイクロビーム分析装置による元素イメージング測定

筑波大学 6 MV タンデム加速器 A3 コースに構造材料計測用マイクロビーム分析装置を設計開発した。収束イオンビームスキャン照射の特長を生かせる透過型反跳粒子検出分析法 (Elastic Recoil Detection Analysis: ERDA) を実施して、構造材料中の水素についてマイクロメートルオーダーの位置分解能を有するイメージングを実現した。また、PIXE 測定と両立させることにより、水素を含む多元素同時イメージングを実用化した。図 2 (左) は、透過 ERDA-PIXE 同時測定の配置図である。水素を含んだ材料を模擬したものとして、電子顕微鏡調整用銅メッシュ、有機膜、アルミニウムの 3 層構造を持った試料 (全体厚さ約  $90 \mu\text{m}$ ) を作成した。銅メッシュ側からヘリウムビームをスキャン照射し、反跳水素 (透過 ERDA) と銅の特性 X 線 (PIXE) を観測した。測定結果の例を図 2 (右) に示す。照射領域は  $250 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$  で、図左は透過 ERDA による水素分布図である。ヘリウムビームが銅メッシュに照射された位置には有機膜中の水素は反跳放出されず、直接有機膜に照射された位置でのみ反跳水素が検出されているのがわかる。図右には、PIXE による銅メッシュ (太さ  $12 \mu\text{m}$ ) の像が見られる。本計測手法により、試料中の水素分布をマイクロメートルオーダーの精度でイメージング化することが可能

になった。また、他の元素分布も同時に取得することで、水素と他元素の分布の関連性についても情報を得られる。その他、非破壊分析という特長を生かして電子顕微鏡画像などの手法による情報とリンクさせることで、亀裂や結晶粒界など試料中の微細構造との関係についても情報を得ることが可能となった。

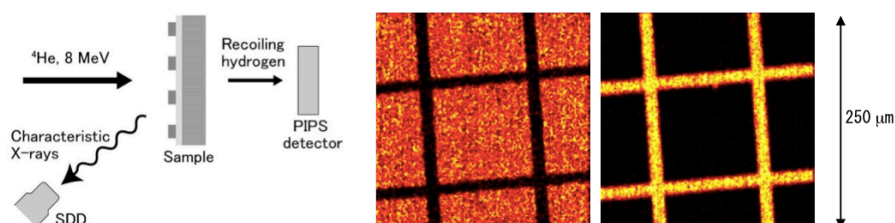


図2 (左図) 透過 ERDA-PIXE 同時測定配置図、(右図) 透過 ERDA-PIXE 同時測定の例 (左：水素、右：銅)

#### (6) 加速器質量分析法によるストロンチウム 90 の迅速定量法の開発

筑波大学 6 MV タンデム加速器質量分析装置を用いてストロンチウム 90 ( $^{90}\text{Sr}$ : 半減期 28.79 年) の迅速定量法の開発を進めている。 $^{90}\text{Sr}$  は、ウランやプルトニウムなどの核分裂生成物であり、原子力発電所での事故や 1950 年代に実施された大気圏内核実験により、環境中に供給された放射性核種である。しかし、純線放出核種である  $^{90}\text{Sr}$  の分析には複雑な化学操作と時間が掛かるため、迅速な定量手法の開発が求められている。本研究では、 $^{90}\text{Sr}$  を加速することで、物質 (検出器内のガス) でのエネルギー損失差を利用して妨害となる同重体 (同重分子や  $^{90}\text{Zr}$  など) を分離識別して、直接的に検出する手法を開発した。 $\text{Sr}$  は電子親和力が低いために負イオンを形成し難い。そのため、フッ化ストロンチウム ( $\text{SrF}_2$ ) から、負分子イオン  $\text{SrF}_3^-$  を引き出した。なお、 $\text{Cs}^+$  ビームのスパッタリングによるチャージアップを防ぐために、導電性の  $\text{PbF}_2$  粉末を重量比  $\text{SrF}_2 : \text{PbF}_2 = 1 : 4$  で混合した。 $^{88}\text{SrF}_3^-$  のビーム電流として、最大で約 400 nA を得ている。相对比较検定のための標準試料は、IAEA の Proficiency Test 試料を希釈したものを用いた。 $^{90}\text{Sr}$  の AMS 測定では、加速電圧 6 MV により  $^{90}\text{Sr}^{8+}$  を 51.8 MeV まで加速した。測定系では、5 枚電極型 E-E ガス電離箱についてガス圧力等の最適測定条件を調べて、同重体の  $^{90}\text{Zr}$  との分離識別を試みた。標準試料 ( $^{90}\text{Sr}/\text{Sr} = 3.38 \times 10^{-9}$ ) とブランク試料についての 2 次元スペクトルの測定図 3 (左) を示す。本研究成果として、国内初となる  $^{90}\text{Sr}$  の AMS による直接検出に成功した。図 3 (右) に  $^{90}\text{Sr}$ -AMS における検量線の結果を示す。 $^{90}\text{Sr}$  の検出限界として、 $^{90}\text{Sr}/\text{Sr} \sim 6 \times 10^{-13}$  ( $\sim 3 \text{ mBq}$ ) を達成している。30 分程度の計測時間で、測定精度  $\sim 3\%$  ( $^{90}\text{Sr}/\text{Sr} \sim 10^{-10}$ ) を得た。AMS による  $^{90}\text{Sr}$  の測定性能として世界最高感度であり、従来の線計測による  $^{90}\text{Sr}$  定量方法と同等の検出限界を得ることができた。

#### (7) 宇宙線生成核種 $^{36}\text{Cl}$ 降下フラックスの変動評価

$^{36}\text{Cl}$  (半減期 30.1 万年) は大気中で宇宙線と  $\text{Ar}$  との核反応 ( $^{40}\text{Ar}(p, X)^{36}\text{Cl}$  など) によって生成され、地表へ降下する。このような核種は宇宙線生成核種と呼ばれており、その生成率は宇宙線強度変動に依存する。地球へ降り注ぐ宇宙線量は、主に太陽活動と地磁気の強度に依存することが知られている。よって、宇宙線生成核種の降下フラックスを測定することで、宇宙線強度変動の復元が期待されている。本研究では、降水中に含まれる  $^{36}\text{Cl}$  について注目し太陽黒点数との比較をおこなった。降水中

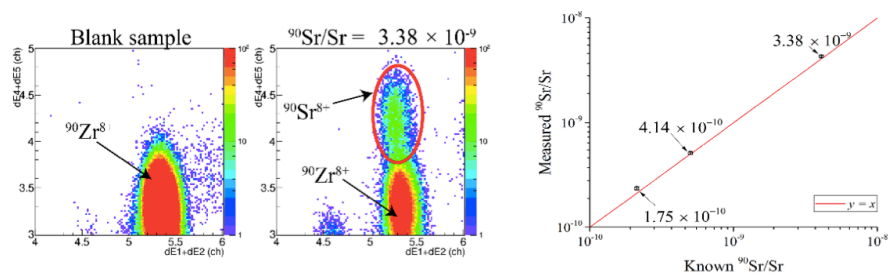


図3 (左図) 標準試料 ( $^{90}\text{Sr}/\text{Sr} = 3.38 \times 10^{-9}$ ) とブランク試料の2次元スペクトル図、(右図) 標準試料を用いた  $^{90}\text{Sr}$  検量線の結果。横軸は既知の値で縦軸が測定値となる。

の  $^{36}\text{Cl}$  を分析するにあたり、筑波大学構内で2010年1月から2014年9月まで一ヶ月ごとに降水を採取した。そして、筑波大学AMSシステムを用いて降水中  $^{36}\text{Cl}$  同位体比 ( $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ ) を測定し、結果から  $^{36}\text{Cl}$  降下フラックスを計算した。図4は測定から得られた一ヶ月ごとの  $^{36}\text{Cl}$  降下フラックスを一年ごとに平均した結果(2004年から2009年のデータは Y. Tosaki et al., 2012 による)と、太陽黒点数との比較を示している。ただし、2011年は3月に発生した福島第一原子力発電所事故によって放出された  $^{36}\text{Cl}$  の影響が大きい。2011年および1月から9月までのみデータを取得した2014年を除いて、 $^{36}\text{Cl}$  降下フラックスと太陽黒点数との相関係数を計算すると相関係数  $r = -0.4$  となった。なお、計算の際には  $^{36}\text{Cl}$  が大気中で生成されてから地表へ降下するまで2年かかると仮定している。以上の結果より、 $^{36}\text{Cl}$  降下フラックスと太陽黒点数は逆相関することが本研究において確認された。

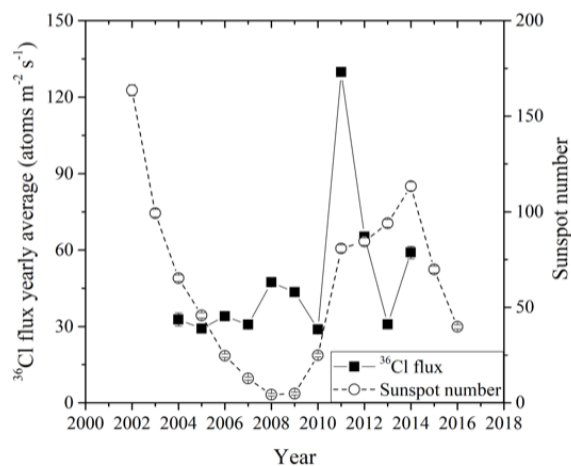


図4  $^{36}\text{Cl}$  降下フラックスと太陽黒点数との比較

#### (8) Lamb シフト型偏極イオン源の偏極陽子ビームの偏極度測定

筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門のLambシフト型偏極イオン源(PIS)は、東日本大震災による大きな被害を受けたが、平成26年度末までに再構築を終え、その後、偏極ビームの生成を確認している。平成29年度は、主に、6MVタンデム加速器によって加速させた偏極陽子ビームの偏極度測定を行った。

本測定では、PIS からの偏極陽子を 12 MeV まで加速させ、測定室の A6 コースへと輸送させた。コースの末端には、 $^4\text{He}$  との弾性散乱を利用したポラリメータを設置した。ポラリメータの内部は  $^4\text{He}$  ガス（約 1 気圧）で満たされており、左右には弾性散乱をした陽子を検出するためのシリコン半導体検出器が装填されている。偏極度  $P$  は、 $A \cdot P = \frac{N_L - N_R}{N_L + N_R}$  によって表すことができる。 $A$  は偏極分解能で、12 MeV の陽子と  $^4\text{He}$  との弾性散乱の場合、 $A = 1$  と近似できる。 $N_L$  と  $N_R$  は、それぞれポラリメータの左側と右側のシリコン半導体検出器で検出された弾性散乱陽子のイベント数である。図 5 は、左右のシリコン半導体検出器によって得られたエネルギースペクトルである。図 5 中のメインピークは弾性散乱イベントであり、スピンの上向き（下向き）の場合、左側（右側）の方が他方に比べてイベント数が多いのがわかる。この結果から、ビームコース末端における偏極陽子ビームの偏極度は約 44%（スピン上向き）と 37%（スピン下向き）だった。これらの偏極度は、PIS 下流における偏極度（約 80%）に比べると低い。この減偏極の原因としては、ビームライン中の残留ガスの影響が考えられるが、原因は調査中である。

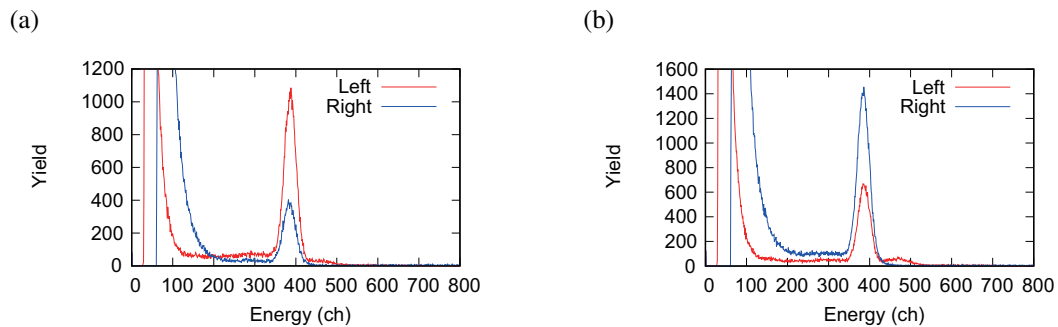


図 5 ポラリメータの左側（赤線）と右側（青線）のシリコン半導体検出器によって得られたエネルギースペクトル。(a) と (b) は、それぞれスピンの上向きと下向きの偏極陽子ビームを用いた場合の結果である。

#### (9) 固体水素標的を用いた不安定核のスキン厚導出手法の開発

不安定核にはスキン構造と呼ばれる安定核に見られない現象がある。スキンとは不安定核の表面に現れる過剰の中性子もしくは陽子の層を指す。不安定核におけるスキン厚の実験値は、これまで、オプティカルアイソトープシフト (OIS) の測定と反応断面積の測定から導出してきた。ところが、OIS の測定は実験的な制限により測定可能な同位体が限られており、不安定核のスキン厚の実験データは乏しいのが現状である。本研究は、反応断面積測定だけから不安定核の陽子密度分布と中性子密度分布を別々に求め、それらからスキン厚を導出することを目的としている。

実験は、放射線医学総合研究所のシンクロトロン施設 HIMAC で進めている。前年度はテスト実験を実施し、測定システムに問題ないことを確認した。平成 29 年度は、固体水素標的を用いて  $^{17}\text{Ne}$  と  $^{17}\text{F}$  の反応断面積測定を実施した。 $^{17}\text{Ne}$  のスキン厚は実験的に報告されており、本研究の結果と比較が可能である。一方、 $^{17}\text{F}$  のスキン厚の実験値はこれまでに報告されていない。一次ビームとして 180 MeV/u、もしくは、400 MeV/u の  $^{20}\text{Ne}$  を Be 標的に照射し、 $^{17}\text{Ne}$  と  $^{17}\text{F}$  の二次ビームを生成した。実験では、ビームエネルギーによって  $\phi 50 \times 30 \text{ mm}^3$  と  $\phi 50 \times 100 \text{ mm}^3$  の固体水素標的を使い分けた。プラスチックシンチレータやイオンチェンバー等の検出器を用いて、固体水素標的の上流と下流の粒子識別を行い、入射粒子数と出射粒子数の比から反応断面積を求めた。図 6 は、本研究で得た  $^{17}\text{Ne}$  と  $^{17}\text{F}$  の反応断面積のエネルギー依存性である。 $^{17}\text{Ne}$  に関しては、スキン厚導出にとって重要とされる 100 MeV/u 以下のデータを中心に取得した。また、 $^{17}\text{F}$  に関しては、100 MeV/u 以下のデータは今後取得する予定



である。現在、これらの実験データと Glauber モデルを用いた解析を進めており、スキン厚の導出を試みている。

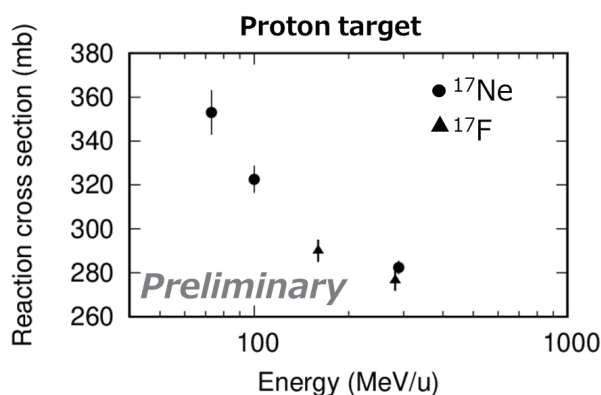


図6 固体水素標的を用いた  $^{17}\text{Ne}$  と  $^{17}\text{F}$  の反応断面積。

#### (10) 稀少 RI リングでの精密質量測定に用いる飛行時間検出器の開発

稀少 RI リングを用いた質量測定では、飛行時間の測定から粒子の速度とリング内周期をそれぞれ決定して質量を求める。飛行時間検出器に求められる性能は、(1) 100 ps 以下の時間分解能、(2) 検出器内での速度変化が  $10^{-4}$  以下であること、(3) 100 % の検出効率、(4)  $\phi 30$  mm 以上のアクセプタンスを有することである。これらの要請を満足する飛行時間検出器の開発を行なっている。開発中の検出器は、荷電粒子が薄膜を通過した時に等方的に放出される二次電子を、静電磁場を用いてマイクロチャンネルプレート (MCP) へと誘導し、荷電粒子の通過を検出する仕組みとなっている (図 7)。この検出器は、電磁場による二次電子の等時性輸送と薄膜を用いるため、上述の要求を満たすことが原理的に可能である。重イオンの薄膜通過においては十分な量の二次電子が生成されるため、理想的な検出効率も見込める。

昨年度は、 $\phi 45$  mm の薄膜と  $\phi 42$  mm の MCP を備えることによりビームに対する有効領域を拡大を図った。重イオンビームを用いた性能試験では、時間分解能は  $\sigma \sim 60$  ps であり、検出効率は最大 99 % を得ることができた。

今年度は、ビームに軸に対して検出器の前後に位置する正電極の薄膜を無くすことによって検出器内での速度変化をさらに抑えた。これにより、速度変化を  $2 \times 10^{-5}$  にすることができる。放射線医学総合研究所の HIMAC (Heavy Ion Accelerator in Chiba) から供給される  $^{84}\text{Kr}$  ビームを用いた性能評価実験では、時間分解能は  $\sigma = 53(2)$  ps であり、検出効率は最大 98(7) % を得た。しかしながら正電極の薄膜を薄膜を無くしたことによる電場の歪みは無視できず、二次電子の輸送時間には 150 ps 程度の位置依存性があり、満足できる性能ではなかった。

今後は、電極の形状を変化させることにより、二次電子の輸送時間を荷電粒子の通過位置に依らないよう改善し、質量測定に使用できるよう完成を目指す。

#### (11) 新しい準非破壊的な位置検出器の開発

稀少 RI リングを用いた質量測定実験では、飛行時間検出器の他に、粒子の磁気剛性率を測定するための位置検出器も必要である。位置検出器は、粒子の通過位置が運動量分散に依存する Dispersive な焦



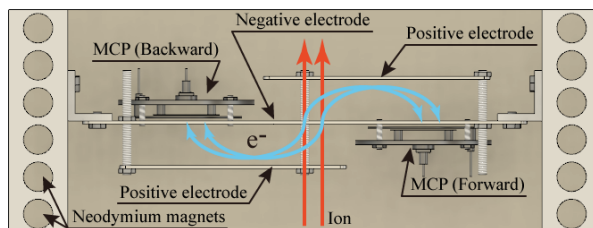


図7 飛行時間検出器の模式図。負電極中央に取り付けられた薄膜から発生した二次電子を検出する。

点面に置かれる。これまでの稀少 RI リングのコミッショニング実験では、RIBF で一般的に利用されている PPAC [Kumagai ら NIM2013] を用いてきた。PPAC はガス放電を検出原理とし、数 10 Torr のガスとガスを封じ込めるマイラー膜から構成されている低物質量の位置検出器である。しかし、それでも粒子の速度変化は約  $1 \times 10^{-3}$  と無視できず、粒子の速度から決定される質量精度に制限を与える。そこで本研究では、PPAC に置き換わる速度変化を無視できる薄膜を利用した位置検出器の開発を進めている。この位置検出器は、薄膜を用いた飛行時間検出器の原理を応用した全く新しいオリジナルの位置検出原理を持つ。どちらの検出器も、荷電粒子が薄膜を通過する際に放出される二次電子を電場と磁場を用いてマイクロチャンネルプレート (MCP) に導く。飛行時間検出器では、二次電子を 180 度偏向するため、荷電粒子の通過位置によらず二次電子の輸送時間はほぼ一定である。一方、位置検出器では、MCP の位置を薄膜に対して 90 度に設置することにより、二次電子の輸送時間に位置依存性を持たせている。そして、薄膜の前方及び後方に放出される二次電子の輸送時間の差から荷電粒子の薄膜通過位置を測定する (図 8)。

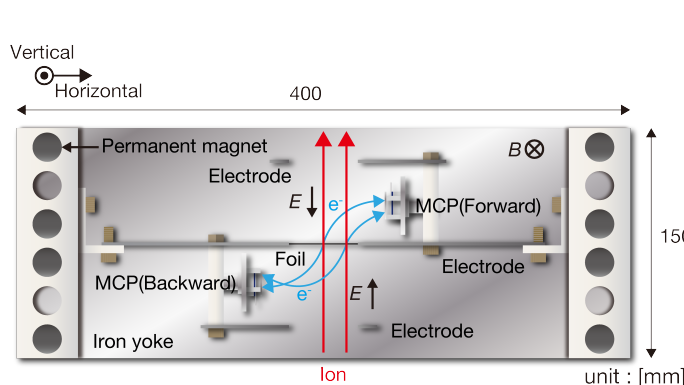


図8 新しい位置検出器の模式図。前方・後方の二次電子の輸送時間は荷電粒子の水平入射位置に依存する。

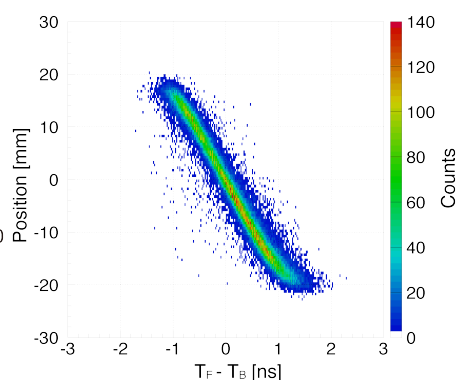


図9 荷電粒子の入射位置と前方・後方の二次電子の輸送時間差の相関を表す 2 次元ヒストグラム。

原理検証のため、 $\phi 45$  mm の薄膜と  $\phi 15$  mm の MCP 検出器を備えた小型試作機を作成した。薄膜には  $1 \mu\text{m}$  のマイラーの両面に約 100 nm のアルミニウムをコーティングしたものを使用し、PPAC と比べて約  $\frac{1}{45}$  の厚さに抑えられている。磁場と電場はそれぞれ、約 90 Gauss と約 230 V/mm である。重イオンビームを用いた検証実験では、 $\pm 20$  mm の範囲で、約 2.5 ns の時間差を観測した (図 9)。これにより、前方と後方に輸送される二次電子の時間差から位置を測定できることを実証した。検出効率率は約 99%、位置分解能は 2 mm 以下と性能も良好であった。今後は、質量測定実験で使用する有効領域を拡大した大型実機の作成を行う。

## 【2】高エネルギー原子核実験グループ

(三明康郎、江角晋一、中條達也、Oliver Busch、坂井真吾、渡辺陽介、加藤純雄)

### (1)LHC-ALICE 実験における pp 及び Pb-Pb 衝突実験での荷電粒子ジェット生成についての研究

通常、ハドロン内に閉じ込め状態にあるクォークやグルーオン (パートン) は、高エネルギー原子核衝突によって生み出される超高温・高密度環境下では一定領域内を自由粒子のように振る舞うことができる Quark-Gluon Plasma(QGP) 相へと相転移する。衝突実験において高運動量を持つ粒子が一定領域内に束になって観測されることがあり、この現象はジェットと呼ばれる。ジェットは衝突初期におけるパートン間での高運動量移行を伴う相互作用過程を起源とし、衝突によって生成された QGP との相互作用を経て観測されると考えられ、QGP 物性を探る上での非常に良いプローブである。

我々は 2015 年に収集された  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV の pp 及び Pb-Pb 衝突実験の現在使用可能である全統計量を用いて荷電粒子生成量の測定を行った。原子核衝突における原子核効果を定量的に評価するため、pp 衝突における結果を基準として Nuclear modification factor( $R_{AA}$ ) を測定した。測定された荷電粒子ジェットの  $R_{AA}$  を図 10 に示す。 $R_{AA} < 1$  は pp 衝突と比較して Pb-Pb 衝突ではジェット収量が抑制されていることを示し、これは QGP との相互作用によるパートンのエネルギー損失があったためであると解釈できる。

本結果は今後、pp 衝突におけるジェット生成量や QGP 中でのエネルギー損失効果についての理論モデル計算との比較等を含め、査読付き論文としてまとめる予定である。

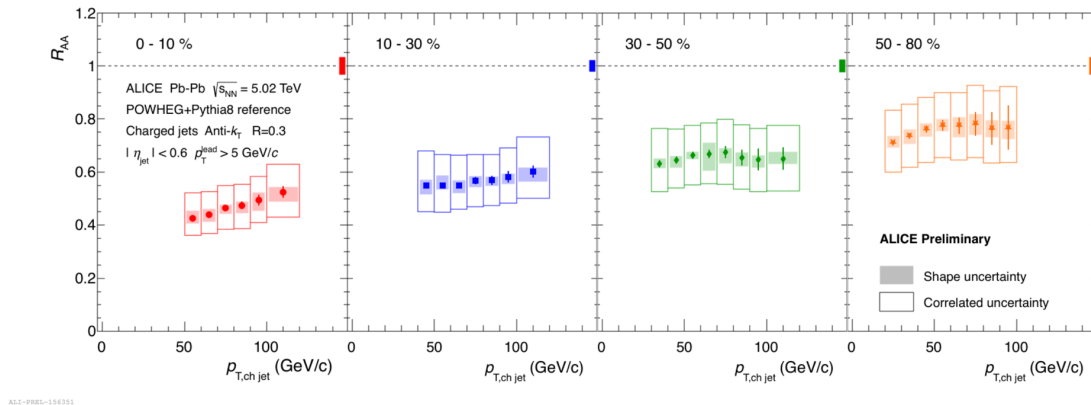


図 10 荷電粒子ジェットの  $R_{AA}$

### (2)LHC-ALICE 実験におけるチャーム・ボトムクォークの測定

チャームクォークやボトムクォークは質量が QGP の温度よりも大きいために熱的に生成されるのではなく、衝突初期のハード散乱によってのみ生成される。陽子-陽子衝突でのハード散乱によるチャーム・ボトムクォークの生成は QCD 計算で記述できその生成機構がよくわかっているため、高エネルギー重イオン衝突によって生成される高温高密度物質 (QGP) の性質を探索する上で重要な観測量として盛んに測定が行われている。図 11 は ALICE 実験で測定されたチャーム・ボトムクォークを含む D 中間子及び B 中間子の崩壊を起源とする電子の  $R_{AA}$  (重イオン衝突における粒子収量を陽子 + 陽子衝突

における収量 × 平均核子衝突回数で割ったもの) である。陽子-鉛衝突では  $R_{AA}$  は 1 と無矛盾である一方、鉛-鉛衝突においては  $R_{AA} < 1$  であり、これはチャーム・ボトムクォークが QGP 通過中にエネルギーを失い、生成量が減少したことを示唆する。

また、7 TeV 陽子-陽子衝突においてチャームクォークを含むバリオンである  $\Xi_c^0$  粒子が ALICE 実験において始めて測定された。図 12 は  $\Xi_c^0$  粒子と  $D^0$  中間子の生成断面積の比をとったバリオン/メソン比と呼ばれる量である。既存のモデル計算が実験結果を過小評価していることが分かり、より詳細なハドロン化機構の理解が必要であることを示した。今後は陽子-鉛衝突及び陽子-陽子衝突における  $D$  中間子及び  $B$  中間子の崩壊起源電子の高横運動量領域における詳細な測定や、チャーム・ボトムクォークを起源とするジェット (パートンが破碎した粒子群) の研究を推進する予定である。

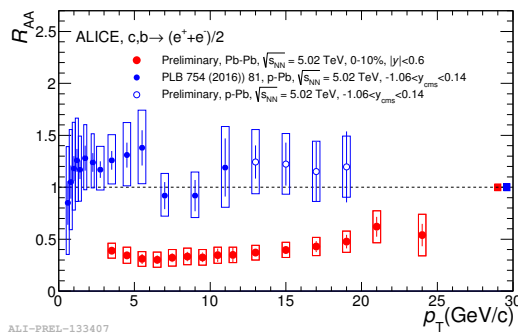


図 11  $D$  中間子及び  $B$  中間子起源の電子の  $R_{AA}$   
(赤:5.02 TeV 鉛-鉛衝突、青:5.02 TeV 陽子-鉛衝突)

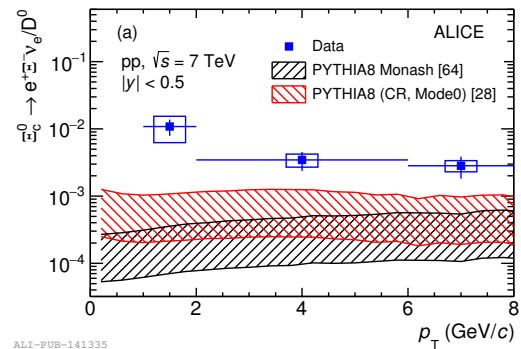


図 12 7 TeV 陽子-陽子衝突における  $\Xi_c^0/D^0$  比

### (3)LHC-ALICE 実験における HBT 測定

重イオン衝突では、発生するハドロン同士の量子力学的な干渉効果を測定することにより QGP のフリーズアウト時の大きさや衝突後の時空発展の描像を調べることができる HBT 測定がある。QGP の性質の一つに、衝突に参加した粒子の空間的な異方性による、衝突後の楕円的な集団膨張運動が知られているが、フリーズアウト時の楕円的な空間的異方性は衝突初期の形状を反映しているということが、この HBT 測定により理解されている。

LHC-ALICE 実験では、さらにこの現象を理解するために集団膨張運動の大きさによって事象を選択する Event Shape Engineering 法を適用した。その結果、集団膨張運動のより大きい事象ではフリーズアウト時の楕円的な空間的異方性がより強く残っていることがわかった。この結果は、集団膨張運動とフリーズアウト時の空間的な異方性の起源が初期の形状によるものということを強く支持するものである。

### (4)RHIC-STAR 実験における event shape engineering を用いた 2 粒子相関の反応平面依存性の測定

原子核衝突実験において初期に起こるパートン同士の二体散乱を起源とした高エネルギーの粒子群であるジェットが生成される。ジェットは QGP 中で相互作用し、そのエネルギーを損失する。このことから、ジェットは QGP 中でのエネルギー損失機構の解明のために用いられてきた。

近年、粒子多重度による中心衝突度の決定に加えて、集団膨張運動 (flow) の強度を用いて事象の形状を選択する手法として、Event Shape Engineering(ESE) が提案された [2]。これを用いることで、ジェッ

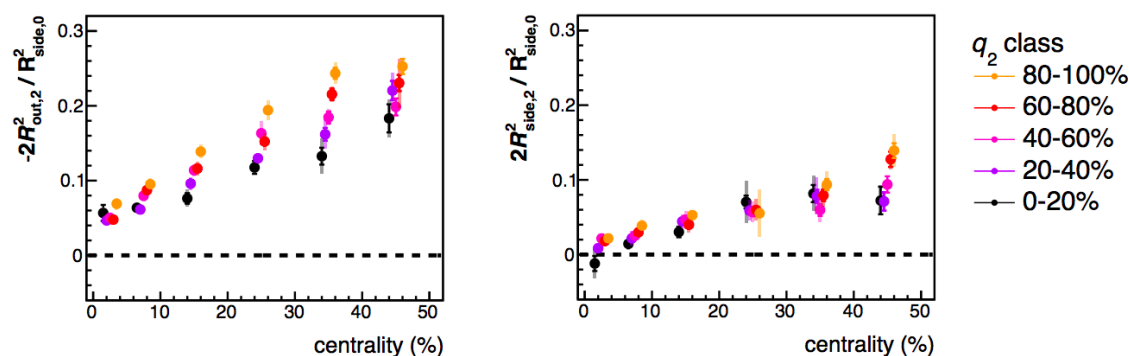


図 13 フリーズアウト時の楕円率 ( $-2R^2_{out,2}/R^2_{side,0}, 2R^2_{side,2}/R^2_{side,0}$ ) と Centrality 及び  $q_2$  selection との関係 [1]

トの QGP 中でのエネルギー損失の通過距離依存性および、QGP との相互作用によって失われたエネルギーの再分配と系の膨張運動に関してより詳細な測定を行うことができる。

図 14 は、2 粒子相関の反応平面依存性を楕円フローが強い事象と弱い事象で測定した結果である。反応平面方向の収量が増大しており、楕円フローがより強い方向、つまり通過距離が短い方向での収量が増大していることが明らかになった。

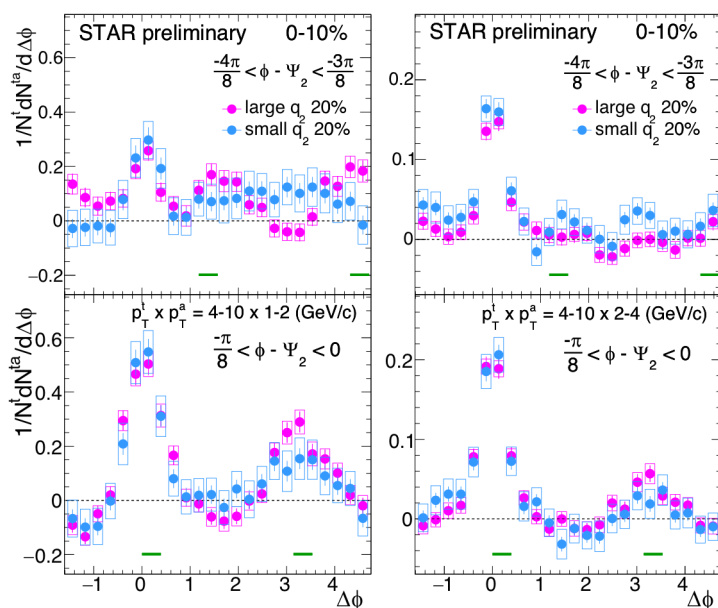


図 14 2 粒子相関分布の反応平面及び  $q_2$  依存性

#### (5) RHIC-STAR 実験における unfolding を用いた net-proton 分布の高次キュムラント測定

QCD 相構造の解明および臨界点探索を目的として、理論的・実験的に様々なアプローチで研究が行われてきた。実験においては net-proton をはじめとした保存量の衝突事象ごとの高次揺らぎが重要な測定量の一つとして測定が行われてきた。[3]

また、近年実験によって得られた揺らぎに対する検出効率の補正に関する研究も進められており、その一つが unfolding (図 15) である。通常検出効率の補正として行われるのは二項分布を前提とした補正

であるが、実際の実験でこの前提が破れていた場合は正しく補正することができない。一方で unfolding を用いればシミュレーションの input と output の情報を用いて分布自体を再構成することができ、2 項分布を前提としない場合にも応用が可能であり、より正確な補正が期待される。実験の検出器を再現する詳細な Geant シミュレーションにより、検出器の応答関数が、従来の efficiency 補正と二項分布より広い分布を持つ beta-binomial 分布に違いことが示された。図 16 に示す様に、実験において測定された net-proton 分布から、その応答関数を用いて、unfolding を用いて  $C_6/C_2$  を計算し比較した [4]。

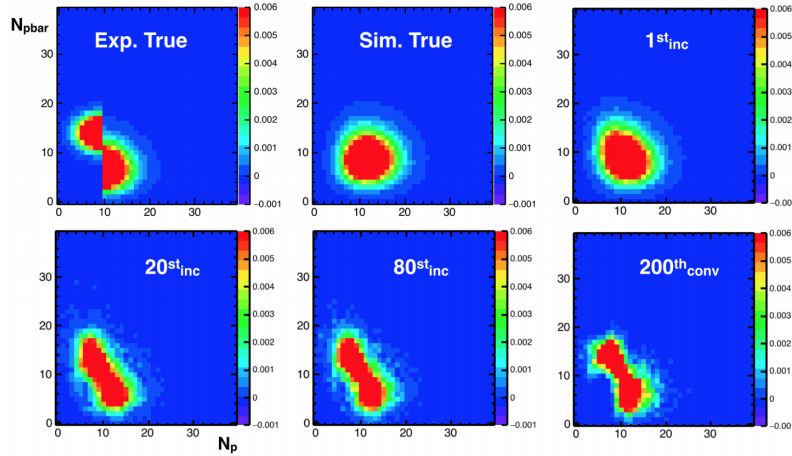


図 15 toy model simulation において unfolding を適用し、再構成された分布 [4]

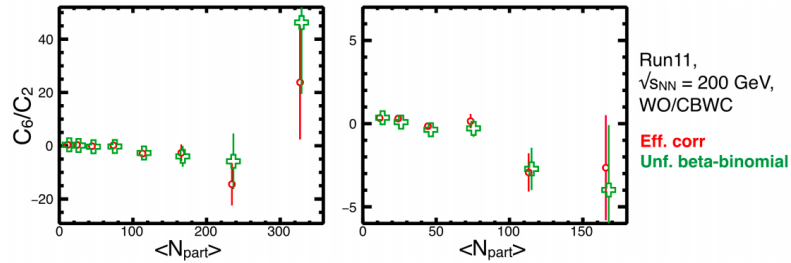


図 16 net-proton の  $C_6/C_2$  における unfolding と efficiency 補正の比較 [4]

#### (6) RHIC-STAR 実験 $\sqrt{s_{NN}}=4.5\text{GeV}$ 固定標的における方位角異方性の測定

現在 RHIC-STAR 実験では衝突エネルギーを 7.7~200 GeV までスキャンすることで QCD 相図の臨界点やハドロン相とパートン相の相転移の境界についての研究が行われている (Beam Energy Scan)。

Cern の NA49 で行われた実験で、 $\sqrt{s_{NN}}=7.7\text{ GeV}$  において相転移と考えられるシグナルが観測された [5]。RHIC では固定標的に対してビームを衝突させることでより低い  $\sqrt{s_{NN}}=4.5\text{ GeV}$  を実現し方位角異方性を測定し、AGS で取得された  $\sqrt{s_{NN}}=4.9\text{ GeV}$  の結果と比較された。

粒子識別された荷電粒子ごとに 1 次の方位角異方性の傾きが測定された。 $\pi$  と  $K_s^0$  については BES の結果を支持するものとなり、proton の結果については AGS の proton と  $\Lambda$  の結果を支持するものとなり以前の結果を一通り再現する結果となった (図 17)。同様に 2 次の異方性の  $p_T$  依存性についても AGS の結果を再現するものとなった (図 18)。

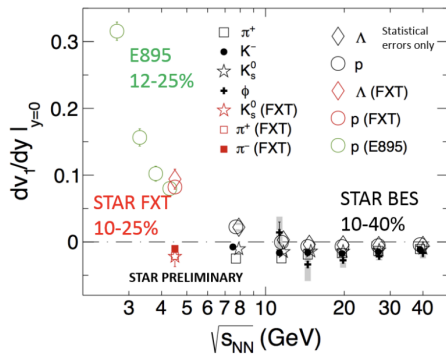


図 17 1 次の方角角異方性の傾きのエネルギー依存性 [6]

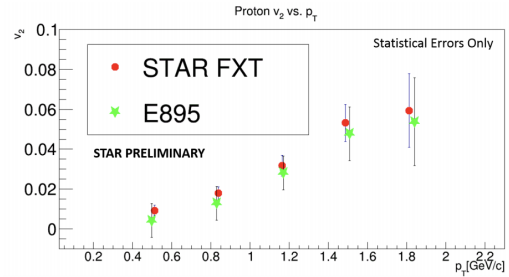


図 18 2 次の方角角異方性の  $p_T$  依存性 [6]

#### (7) 飛行時間測定器 MRPC に対する構造による時間分解能の改善

J-PARC 重イオン衝突実験では、飛行時間測定器として MRPC が採用される予定である。広い検出面積を持ち、かつ高い時間分解能を有する大型 MRPC の開発が求められている。[7]

基本構造の MRPC には、信号誘起パッド部分での信号の反射による波形劣化や、雑音による信号劣化などの課題を抱えていた。そこで、金属導体の構造中への導入、信号誘起パッドの形状変更を施すことによって、高周波信号の伝送特性や、耐雑音特性の改善を目指した。

20 cm × 30 cm の検出面積を持つ、金属導体を導入した大型 MRPC を設計・制作し、宇宙線の TOF の測定実験を行った結果、信号を観測することに成功した。更に観測されたデータから TOF を解析した結果、 $213.9 \pm 6.6$  ps の時間分解能を得た。

また新設計の信号誘起パッドの S パラメータ解析を行った結果、インピーダンス分布について顕著な改善が見られ、信号の伝送線路上での反射量の減少に成功したことが期待される。この信号誘起パッドを用いた MRPC を制作し、TOF 検出器としての性能を確認することが求められる。

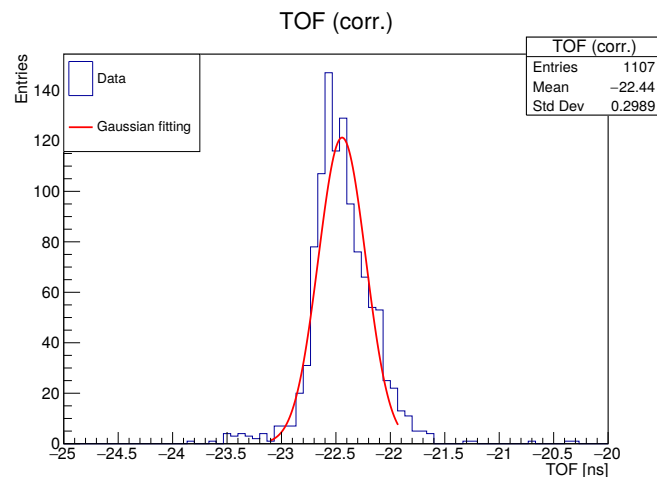


図 19 金属導体を導入した大型 MRPC によって測定された TOF の分布



## (8)LHC-ALICE 実験 Si-W 型電磁カロリメータ実証機に向けた APV25 搭載 front-end 読み出しシステムの評価

QGP の性質の解明を目的として、スイス・ジュネーブにある欧州原子核機構 (CERN) では LHC 加速器を用いて ALICE 実験が行われている。この実験の改良を目的として、新たな検出器である FoCal を作る FoCal project がある。FoCal のは超前方方向に設置され、目的は重イオンの衝突後ビーム軸の前方方向に生成される高い運動量を持った光子・ハドロン・ジェットの測定である。この測定により QGP の生成の初期条件の解明が期待されている。この project は 4 年前に始動し、過去様々な試作機を作っては CERN でのテストを行ってきた。2017 年度は過去の結果をもとにノイズを減らす新たな読み出し方法を搭載した試作機を作り、東北大学電子光学研究センターの加速器施設でテストを行った。その結果として、ノイズを減らし MIP(最小電離損失粒子) の観測に成功した。図 20 電磁シャワーを起し読み出した信号は Geant4 でのシミュレーションと比較しても良い一致が見られた。今後は今回の結果を踏まえて、2018 年度に CERN で行われるテストに向けて新たな試作機を作っていく。

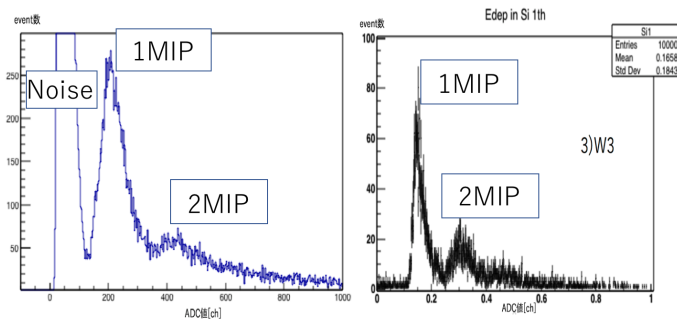


図 20 GEANT4 によるシミュレーションと実際の測定されたデータの比較

## 参考文献

- [1] 田中直斗, "Measurements of azimuthal angle dependence of HBT radii with respect to the event plane in  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV Pb-Pb collisions at LHC-ALICE", 筑波大学大学院数理物質科学研究科博士論文 (2017)
- [2] J. Schukraft, A. Timmins and S. A. Voloshin, Phys.Lett.B **719** (2013) 394-398
- [3] STAR collaboration, Phys. Rev. Lett. 113, 092301(2014)
- [4] T. Nonaka, "First measurement of the sixth order cumulant of net-proton multiplicity distributions in  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV Au+Au collisions at the STAR experiment", Ph.D Thesis at the University (2017)
- [5] NA49 Collaboration, Phys. Rev. C 77 (2008) 024903
- [6] Kathryn Meehan *et al.* (STAR Collaboration), Nucl.Phys. A 967 (2017) 808-811
- [7] H.Sako, T.Chujo, T.Gunji et al. "Towards the heavy-ion program at J-PARC"



## 原子核実験グループ研究業績リスト

### < 原著論文 >

1. T. Tanaka, Y. Narikiyo, K. Morita, K. Fujita, D. Kaji, K. Morimoto, S. Yamaki, Y. Wakabayashi, K. Tanaka, M. Takeyama, A. Yoneda, H. Haba, Y. Komori, S. Yanou, B. J.-P. Gall, Z. Asfari, H. Faure, H. Hasebe, M. Huang, J. Kanaya, M. Murakami, A. Yoshida, T. Yamaguchi, F. Tokanai, T. Yoshida, S. Yamamoto, Y. Yamano, K. Watanabe, S. Ishizawa, M. Asai, R. Aono, S. Goto, K. Katori, and K. Hagino, Determination of fusion barrier distributions from quasielastic scattering cross sections towards superheavy nuclei synthesis, *J. Phys. Soc. Jpn.* 87, 014201/1-9 (2018).
2. Q. Zeng, M. Wang, X. H. Zhou, Y. H. Zhang, X. L. Tu, X. C. Chen, X. Xu, Yu. A. Litvinov, H. S. Xu, K. Blaum, R. J. Chen, C. Y. Fu, Z. Ge, W. J. Huang, H. F. Li, J. H. Liu, B. Mei, P. Shuai, M. Si, B. H. Sun, M. Z. Sun, Q. Wang, G. Q. Xiao, Y. M. Xing, T. Yamaguchi, X. L. Yan, J. C. Yang, Y. J. Yuan, Y. D. Zang, P. Zhang, W. Zhang, and X. Zhou, Half-life measurement of short-lived  $^{94}\text{mRu}44+$  using isochronous mass spectrometry, *Physical Review C* 96, 031303(R)/1-5 (2017).
3. J. C. Zamora, T. Aumann, S. Bagchi, S. Boenig, M. Csatos, I. Dillmann, C. Dimopoulou, P. Egelhof, V. Eremin, T. Furuno, H. Geissel, R. Gernhaeuser, M. N. Harakeh, A.-L. Hartig, S. Ilieva, N. Kalantar-Nayestanaki, O. Kiselev, H. Kollmus, C. Kozhuharov, A. Krasznahorkay, Th. Kroell, M. Kuilman, S. Litvinov, Yu. A. Litvinov, M. Mahjour-Shafiei, M. Mutterer, D. Nagae, M. A. Najafi, C. Nociforo, F. Nolden, U. Popp, C. Rigollet, S. Roy, C. Scheidenberger, M. von Schmid, M. Steck, B. Streicher, L. Stuhl, M. Thuerauf, T. Uesaka, H. Weick, J. S. Winfield, D. Winters, P. J. Woods, T. Yamaguchi, K. Yue, and J. Zenihiro, Nuclear-matter radius studies from  $^{58}\text{Ni}$  ( , ) experiments at the GSI Experimental Storage Ring with the EXL facility, *Physical Review C* 96, 034617/1-6 (2017).
4. E. Miyata, M. Takechi, T. Ohtsubo, M. Fukuda, D. Nishimura, K. Abe, K. Aoki, A. Ikeda, T. Izumikawa, H. Oikawa, K. Ohnishi, S. Ohmika, I. Kato, Y. Kanke, N. Kanda, R. Kanbe, H. Kikuchi, A. Kitagawa, S. Sato, H. Shimamura, J. Shimaya, S. Suzuki, T. Suzuki, R. Takagaki, H. Takahashi, Y. Takei, Y. Takeuchi, T. Takenouchi, N. Tadano, M. Tanaka, Y. Tanaka, K. Chikaato, H. Du, J. Nagumo, K. Nishizuka, T. Nishimura, S. Fukuda, M. Machida, A. Mizukami, M. Mihara, J. Muraoka, S. Yagi, S. Yamaoka, T. Yamaguchi, K. Yokoyama, Development of high resolution TOF detector for RI beams using Cherenkov radiation, *Acta Phys. Pol. B* 48, 409-412 (2017).
5. H. Du, M. Fukuda, D. Nishimura, M. Takechi, T. Suzuki, Y. Tanaka, I. Kato, M. Tanaka, K. Abe, T. Izumikawa, H. Oikawa, T. Ohtsubo, J. Ohno, Y. Kanke, H. Kikuchi, A. Kitagawa, S. Sato, U. Sayama, J. Shimaya, S. Suzuki, Y. Takeuchi, T. Takemoto, N. Tadano, R. Tamura, J. Nagumo, K. Nishizuka, S. Fukuda, K. Hori, S. Matsunaga, A. Mizukami, M. Mihara, E. Miyata, D. Murooka, S. Yamaoka, T. Yamaguchi, Nuclear structure of  $^{15,16}\text{C}$  via reaction cross-section measurements, *Acta Phys. Pol. B* 48, 473-479 (2017).
6. M. Tanaka, M. Fukuda, D. Nishimura, M. Takechi, S. Suzuki, H. Du, Y. Tanaka, K. Aoki, S. Fukuda, A. Honma, T. Izumikawa, Y. Kamisho, N. Kanda, I. Kato, Y. Kanke, A. Kitagawa, J. Kohno, M. Machida, K. Matsuta, M. Mihara, E. Miyata, Y. Morita, J. Muraoka, D. Murooka, T. Nagai, M. Nagashima, K. Ohnishi, J. Ohno, T. Ohtsubo, H. Oikawa, S. Sato, H. Shimamura, T. Sugihara, T. Suzuki, N. Tadano, R. Takagaki, Y. Takei, A. Takenouchi, S. Yagi, T. Yamaguchi, S. Yamaki, S.

- Yamaoka, Reaction cross sections for 13-15B and one-neutron halo in 14B, *Acta Phys. Pol. B* 48, 461-466 (2017).
7. A. Homma, M. Takechi, T. Ohtsubo, D. Nishimura, M. Fukuda, T. Suzuki, T. Yamaguchi, T. Kuboki, A. Ozawa, S. Suzuki, H. Ooishi, T. Moriguchi, T. Sumikawa, H. Geissel, N. Aoi, R.-J. Chen, D.-Q. Fang, N. Fukuda, S. Fukuoka, H. Furuki, N. Inaba, N. Ishibashi, T. Ito, T. Izumikawa, D. Kameda, T. Kubo, M. Lantz, C. S. Lee, Y.-G. Ma, M. Mihara, S. Momota, D. Nagae, R. Nishikiori, T. Niwa, T. Ohnishi, K. Okumura, T. Ogura, M. Nagashima, H. Sakurai, K. Sato, Y. Shimbara, H. Suzuki, H. Takeda, S. Takeuchi, K. Tanaka, H. Uenishi, M. Winkler, Y. Yanagisawa, Measurements of interaction cross sections for 19-27F isotopes, *JPS Conf. Proc.* 14, 021010/1-3 (2017).
  8. K. Nishizuka, M. Takechi, T. Ohtsubo, D. Nishimura, M. Fukuda, K. Aoki, K. Abe, A. Ikeda, T. Izumikawa, H. Oikawa, K. Ohnishi, J. Ohno, S. Ohmika, I. Kato, Y. Kanke, S. Kanbe, N. Kanda, H. Kikuchi, A. Kitagawa, S. Sato, U. Sayama, J. Shimaya, T. Sugihara, S. Suzuki, T. Suzuki, H. Takahashi, Y. Taguchi, Y. Takei, Y. Takeuchi, A. Takenouchi, T. Takemoto, N. Tadano, M. Tanaka, Y. Tanaka, K. Chikaato, H. Du, T. Nagai, J. Nagumo, S. Fukuda, K. Hori, A. Honma, M. Machida, S. Matsunaga, A. Mizukami, M. Mihara, E. Miyata, D. Murooka, S. Yagi, S. Yamaoka, T. Yamaguchi, K. Yokoyama, Measurements of reaction cross sections for 9-11C, *JPS Conf. Proc.* 14, 021015/1-3 (2017).
  9. K. Sawahata, A. Ozawa, Y. Saito, Y. Abe, Y. Ichikawa, N. Inaba, Y. Ishibashi, A. Kitagawa, S. Matsunaga, T. Moriguchi, D. Nagae, S. Okada, S. Sato, S. Suzuki, T. Suzuki, Y. Takeuchi, T. Yamaguchi, J. Zenihiro, Investigations of charge-changing processes for light proton-rich nuclei on carbon and solid-hydrogen targets, *Nuclear Physics A* 961, 142-153 (2017).
  10. D. Kaji, K. Morita, K. Morimoto, H. Haba, M. Asai, K. Fujita, Z. Gan, H. Geissel, H. Hasebe, S. Hofmann, M. Huang, Y. Komori, L. Ma, J. Maurer, M. Murakami, M. Takeyama, F. Tokanai, T. Tanaka, Y. Wakabayashi, T. Yamaguchi, S. Yamaki, and A. Yoshida, Study of the Reaction  $48\text{Ca} + 248\text{Cm} \rightarrow 296\text{Lv}^*$  at RIKEN-GARIS, *J. Phys. Soc. Jpn* 86, 034201/1-7 (2017).
  11. P. Zhang, X. Xu, P. Shuai, R.J. Chen, X.L. Yan, Y.H. Zhang, M. Wang, Yu.A. Litvinov, K. Blaum, H.S. Xu, T. Bao, X.C. Chen, H. Chen, C.Y. Fu, J.J. He, S. Kubono, Y.H. Lam, D.W. Liu, R.S. Mao, X.W. Ma, M.Z. Sun, X.L. Tu, Y.M. Xing, J.C. Yang, Y.J. Yuan, Q. Zeng, X. Zhou, X.H. Zhou, W.L. Zhan, S. Litvinov, G. Audi, T. Uesaka, Y. Yamaguchi, T. Yamaguchi, A. Ozawa, B.H. Sun, Y. Sun, F.R. Xu, High-precision QEC values of super allowed  $0^+ \rightarrow 0^+$  -emitters  $46\text{Cr}$ ,  $50\text{Fe}$ , and  $54\text{Ni}$ , *Phys. Lett. B* 767, 20-24 (2017).
  12. X. L. Tu, A. Kelic-Heil, Yu. A. Litvinov, Zs. Podolyak, Y. H. Zhang, W. J. Huang, H. S. Xu, K. Blaum, F. Bosch, R. J. Chen, X. C. Chen, C. Y. Fu, B. S. Gao, Z. Ge, Z. G. Hu, D. W. Liu, S. A. Litvinov, X. W. Ma, R. S. Mao, B. Mei, P. Shuai, B. H. Sun, Y. Sun, Z. Y. Sun, P. M. Walker, M. Wang, N. Winckler, J. W. Xia, G. Q. Xiao, Y. M. Xing, X. Xu, T. Yamaguchi, X. L. Yan, J. C. Yang, Y. J. Yuan, Q. Zeng, W. Zhang, H. W. Zhao, T. C. Zhao, and X. H. Zhou, Application of isochronous mass spectrometry for the study of angular momentum population in projectile fragmentation reactions, *Physical Review C* 95, 014610/1-6 (2017).
  13. Y. Hirayama, Y.X. Watanabe, M. Mukai, M. Oyaizu, M. Ahmed, H. Ishiyama, S.C. Jeong, Y. Kakiguchi, S. Kimura, J.Y. Moon, J.H. Park, P. Schury, M. Wada, H. Miyatake, Doughnut-shaped gas cell for KEK Isotope Separation System, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 412, 11 (2017).

14. Y. Hirayama, M. Mukai, Y. X. Watanabe, M. Ahmed, S. C. Jeong, H. S. Jung, Y. Kakiguchi, S. Kanaya, S. Kimura, J. Y. Moon, T. Nakatsukasa, M. Oyaizu, J. H. Park, P. Schury, A. Taniguchi, M. Wada, K. Washiyama, H. Watanabe, and H. Miyatake, In-gas-cell laser spectroscopy of the magnetic dipole moment of the N 126 isotope 199Pt, *Physical Review C* 96 (2017) 014307.
15. Y. Hirayama, M. Mukai, Y. Watanabe, M. Oyaizu, M. Ahmed, Y. Kakiguchi, S. Kimura, Ionization cross section, pressure shift and isotope shift measurements of osmium H. Miyatake, P. Schury, M. Wada and Sun-Chan Jeong, Ionization cross section, pressure shift and isotope shift measurements of osmium, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 50 (2017) 215203.
16. M. Mukai, Y. Hirayama, Y.X. Watanabe, P. Schury, H.S. Jung, M. Ahmed, H. Haba, H. Ishiyama, S.C. Jeong, Y. Kakiguchi, S. Kimura, J.Y. Moon, M. Oyaizu, A. Ozawa, J.H. Park, H. Ueno, M. Wada, and H. Miyatake, High-efficiency and low-background multi-segmented proportional gas counter for  $\alpha$ -decay spectroscopy, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 884,1 (2018).
17. Yukihiro Satou, Keisuke Sueki, Kimikazu Sasa, Hideki Yoshikawa, Shigeo Nakama, Haruka Minowa, Yoshinari Abe, Izumi Nakai, Takahiro Ono, Kouji Adachi and Yasuhiro Igarashi, Analysis of two forms of radioactive particles emitted during the early stages of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station accident, *Geochemical Journal*, Vol. 52, 137-143, 2018. doi:10.2343/geochemj.2.0514
18. Masumi Matsumura, Kimikazu Sasa, Tetsuya Matsunaka, Keisuke Sueki, Tsutomu Takahashi and Hiroyuki Matsuzaki, Temporal variation of iodine-129 in rainwater at Tsukuba before and after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, *Geochemical Journal*, Vol. 52, 155-162, 2018. doi:10.2343/geochemj.2.0504
19. Seiji Hosoya, Kimikazu Sasa, Tetsuya Matsunaka, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Hiroshi Matsumura, Mark Sundquist, Mark Stodola, Keisuke Sueki, Optimization of a  $E - E$  detector for  $^{41}\text{Ca}$  AMS, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 406, 268-271, 2017. DOI: 10.1016/j.nimb.2017.03.161
20. A. Yamazaki, K. Sasa, S. Ishii, M. Kurosawa, S. Tomita, Y. Shiina, S. Shiki, G. Fujii, M. Ukibe, M. Ohkubo, A. Uedono, E. Kita, Development of a microbeam PIXE system for additive light elements in structural materials, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 404 92-95 (2017).
21. Nami Kuroo, Kazuhito Ohmi, Katsunobu Oide, Demin Zhou, and Frank Zimmermann, Cross-wake force and correlated head-tail instability in beam-beam collisions with a large crossing angle, *Phys. Rev. Accel. Beams* 21, 031002 Published 15 March 2018.
22. K. Ohmi, N. Kuroo, K. Oide, D. Zhou, and F. Zimmermann, Coherent Beam-Beam Instability in Collisions with a Large Crossing Angle, *Phys. Rev. Lett.* 119, 134801 Published 26 September 2017.
23. Transverse spin-dependent azimuthal correlations of charged pion pairs measured in  $p + p$  collisions at  $\sqrt{s} = 500$  GeV, STAR collaboration, *Phys. Lett. B* 780 (2018) 332
24. Beam-Energy Dependence of Directed Flow of Lambda, Anti-Lambda, K plus, K minus, K0 short and phi in Au+Au Collisions, STAR collaboration, *Phys. Rev. Lett.* 120 (2018) 62301
25. Azimuthal transverse single-spin asymmetries of inclusive jets and charged pions within jets from polarized-proton collisions at  $\sqrt{s} = 500$  GeV, STAR collaboration, *Phys. Rev. D* 97 (2018) 32004
26. Coherent diffractive photoproduction of  $\phi$  mesons on gold nuclei at RHIC, STAR collaboration,

- Phys. Rev. C 96 (2017) 54904
27. Measurements of jet quenching with semi-inclusive hadron+jet distributions in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, STAR collaboration, Phys. Rev. C 96 (2017) 24905
  28. Bulk Properties of the Medium Produced in Relativistic Heavy-Ion Collisions from the Beam Energy Scan Program, STAR collaboration, Phys. Rev. C 96 (2017) 44904
  29. Measurement of D0 azimuthal anisotropy at mid-rapidity in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, STAR collaboration, Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 212301
  30. Global Lambda hyperon polarization in nuclear collisions: evidence for the most vortical fluid, STAR collaboration, Nature 548 (2017) 62
  31. Measurement of the cross section and longitudinal double-spin asymmetry for di-jet production in polarized pp collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV, STAR collaboration, Phys. Rev. D 95 (2017) 71103
  32. Di-Jet Imbalance Measurements at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV at STAR, STAR collaboration, Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 62301
  33. Charge-dependent directed flow in Cu+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, STAR collaboration, Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 12301
  34. Energy dependence of J/psi production in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 39, 62.4$  and 200 GeV, STAR collaboration, Phys. Lett. B 771 (2017) 13
  35. Direct virtual photon production in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, STAR collaboration, Phys. Lett. B 770 (2017) 451
  36. Measurements of two-pion Bose-Einstein correlations and their Levy parameters in 200 GeV Au+Au collisions, PHENIX collaboration, Phys. Rev. C 97 (2018) 064911
  37. Measurement of identified particle azimuthal anisotropy in p+Au and  $^3\text{He}+\text{Au}$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. C 97 (2018) 064904
  38. Measurements of multiparticle correlations in d+Au collisions at 200, 62.4, 39, and 19.6 GeV and implications for collective behavior, PHENIX collaboration, Phys. Rev. Lett. 120 (2018) 062302
  39. Nuclear dependence of the transverse-single-spin asymmetry for forward neutron production in polarized p+A collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. Lett. 120 (2018) 022001
  40. Measurements of azimuthal anisotropy in d+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200, 62.4, 39,$  and 19.6 GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. C 96 (2017) 064905
  41. B-meson production at forward and backward rapidity in p+p and Cu+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. C 96 (2017) 064901
  42. Measurements of e+e- pairs from open heavy flavor in p+p and d+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. C 96 (2017) 024907
  43. Cross section and transverse single-spin asymmetry of single muons from open heavy flavor decays in polarized p+p collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. D 95 (2017) 112001
  44. Angular Decay Coefficients of J/psi Mesons at Forward Rapidity from p+p Collisions at  $\sqrt{s} = 510$  GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. D 95 (2017) 092003
  45. Measurements of B-meson decayed J/psi at forward rapidity in p+p collisions at  $\sqrt{s} = 510$  GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. D 95 (2017) 092002
  46. Nonperturbative Transverse Momentum Evolution Effects in Dihadron and Direct Photon Hadron

- Angular Correlations at  $\sqrt{s}=510$  GeV, PHENIX collaboration, Phys. Rev. D 95 (2017) 072002
47.  $\phi$  production in pp collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV and in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV, ALICE collaboration, JHEP 04 (2018) 108
  48. First measurement of  $\phi$  production in pp collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 781 (2018) 8
  49. Measurement of Z0-boson production at large rapidities in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 780 (2018) 372
  50. Longitudinal asymmetry and its effect on pseudorapidity distributions in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 781 (2018) 20
  51. Production of  $^4\text{He}$  and  $^4\bar{\text{He}}$  in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV at the LHC, ALICE collaboration, Nucl. Phys. A 971 (2018) 1
  52. Production of deuterons, tritons,  $^3\text{He}$  nuclei and their anti-nuclei in pp collisions at  $\sqrt{s}=0.9, 2.76$  and 7 TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. C 97 (2018) 024615
  53. Search for collectivity with azimuthal  $J/\psi$ -hadron correlations in high multiplicity p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  and 8.16 TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 780 (2018) 7
  54.  $J/\psi$  elliptic flow in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 242301
  55. Constraining the magnitude of the Chiral Magnetic Effect with Event Shape Engineering in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 777 (2018) 151
  56. The ALICE Transition Radiation Detector: construction, operation, and performance, ALICE collaboration, Nucl. Instr. Meth. A881 (2018) 88
  57. Kaon femtoscopy in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. C96 (2017) 064613
  58. Systematic studies of correlations between different order flow harmonics in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. C 97 (2018) 024906
  59.  $\phi$  and  $\omega$  meson production in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=8$  TeV, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 78 (2018) 263
  60. Charged-particle multiplicity distributions over a wide pseudorapidity range in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=0.9, 7$  and 8 TeV, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 852
  61. Measurement of deuteron spectra and elliptic flow in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV at the LHC, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 658
  62. Searches for transverse momentum dependent flow vector fluctuations in Pb-Pb and p-Pb collisions at the LHC, ALICE collaboration, JHEP 09 (2017) 032
  63. D-meson azimuthal anisotropy in mid-central Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. Lett. 120 (2018) 102301
  64. Measuring  $K^0_S$   $\pm$  interactions using Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 774 (2017) 64
  65. Linear and non-linear flow modes in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B773 (2017) 68
  66.  $J/\psi$  production as a function of charged-particle pseudorapidity density in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 776 (2018) 91
  67. Flow dominance and factorization of transverse momentum correlations in Pb-Pb collisions at the

- LHC, ALICE collaboration, Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 162302
68. Production of muons from heavy-flavour hadron decays in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 770 (2017) 459
  69. Azimuthally differential pion femtoscopy in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 222301
  70. Production of  $\phi$  and  $\omega$  mesons up to high transverse momentum in pp collisions at 2.76 TeV, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 339
  71. Energy dependence of forward-rapidity  $J/\psi$  and  $\psi(2S)$  production in pp collisions at the LHC, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 392
  72. Measurement of D-meson production at mid-rapidity in pp collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 550
  73. First measurement of jet mass in Pb-Pb and p-Pb collisions at the LHC, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 776 (2018) 249
  74.  $K(892)^0$  and  $(1020)$  meson production at high transverse momentum in pp and Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. C 95 (2017) 064606
  75. Production of  $(1385)^\pm$  and  $(1530)^0$  in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 389
  76. Insight into particle production mechanisms via angular correlations of identified particles in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. C 77 (2017) 569
  77. Centrality dependence of the pseudorapidity density distribution for charged particles in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 772 (2017) 567
  78. W and Z boson production in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, ALICE collaboration, JHEP 02 (2017) 077
  79. Determination of the event collision time with the ALICE detector at the LHC, ALICE collaboration, Eur. Phys. J. Plus 132 (2017) 99
  80. Measurement of the production of high-pT electrons from heavy-flavour hadron decays in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, ALICE collaboration, Phys. Lett. B 771 (2017) 467
  81. Evolution of the longitudinal and azimuthal structure of the near-side jet peak in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. C 96 (2017) 034904
  82. Anomalous broadening of the near-side jet peak in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, ALICE collaboration, Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 102301
  83. Measurement of electrons from beauty-hadron decays in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV and Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV, ALICE collaboration, JHEP 07 (2017) 052
  84. Recent Flow Results in d+Au Collisions from Beam Energy Scan at RHIC-PHENIX, Shin'ichi Esumi for the PHENIX collaboration, PoS CPOD2017 (2018) 018
  85. Collective flow measurements at RHIC energies, Shin'ichi Esumi, EPJ Web Conf. 141 (2017) 05001
  86. More efficient formulas for efficiency correction of cumulants and effect of using averaged efficiency, T. Nonaka, M. Kitazawa, S. Esumi, Phys. Rev. C 95 (2017) 064912

### < レビュー、解説、書籍等 >

1. 笹 公和、イオンビーム多目的利用研究のための筑波大学 6 MV タンデム型静電加速器、日本加速器学会誌「加速器」、14 巻 1 号 5-14 (2017)

### < 学位論文 (博士) >

1. 数理物質科学研究科・博士 (理学) 横山 広樹 (Hiroki Yokoyama)、Measurement of jet spectra reconstructed with charged particles in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$  with the ALICE detector at the LHC (LHC-ALICE 実験  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$  鉛鉛衝突実験における荷電粒子ジェット の測定)
2. 数理物質科学研究科・博士 (理学) 田中 直斗 (Naoto Tanaka)、Measurements of azimuthal angle dependence of HBT radii with respect to the event plane in  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$  Pb-Pb collisions at LHC-ALICE (LHC-ALICE 実験  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$  鉛・鉛衝突における量子力学的干渉効果のイベント平面に対する方位角依存性の研究)
3. 数理物質科学研究科・博士 (理学) 野中 俊宏 (Toshihiro Nonaka)、First measurement of the sixth order cumulant of net-proton multiplicity distributions in  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$  Au+Au collisions at the STAR experiment (STAR 実験  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$  金・金衝突における陽子-反陽子数分布の 6 次キュムラントの初測定)
4. 数理物質科学研究科・博士 (理学) 木村 創大 (Souta Kimura)、Precision mass measurements of neutron-deficient nuclei in  $A \sim 60-80$  region via multireflection time-of-flight mass spectrograph (多重反射型飛行時間式質量分析器を用いた  $A \sim 60-80$  領域中性子欠乏核の精密質量測定)
5. 数理物質科学研究科・博士 (理学) 向井もも (Momo Mukai)、In-gas-cell laser resonance ionization spectroscopy of  $^{196-198}\text{Ir}$  ( $^{196-198}\text{Ir}$  のガスセル内レーザーイオン化核分光)

### < 学位論文 (修士) >

1. 数理物質科学研究科・修士 (理学) 佐藤 一輝、RHIC-PHENIX 実験における  $\sqrt{s_{NN}} = 200, 62.4, 39, 19.6 \text{ GeV}$  重陽子・金衝突の前方、後方における楕円の集団運動の測定
2. 数理物質科学研究科・修士 (理学) レバザ 義美、ALICE 実験  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$  Pb-Pb 衝突におけるジェットと反応平面を用いたソフト・ハード相関の研究
3. 数理物質科学研究科・修士 (理学) 細谷青児 (Seiji HOSOYA)、6 MV タンデム加速器を用いた難測定核種における加速器質量分析法の開発, Development of hard-to-measure nuclides measurements by Accelerator Mass Spectrometry with the 6 MV tandem accelerator
4. 数理物質科学研究科・修士 (理学) 天野将道 (Masamichi Amano)、固体水素標的を用いた陽子ドリップライン核  $^{17}\text{Ne}$  の反応断面積測定 (Reaction Cross-section Measurement of proton drip line nucleus  $^{17}\text{Ne}$  using Solid Hydrogen Target)



#### < 学位論文 ( 学士 ) >

1. 物理学類・学士 ( 理学 ) 齊藤 大士、HIMAC H355 実験 400AMeV Xe+CsI 衝突における陽子および中性子の指向的方位角異方性の研究
2. 物理学類・学士 ( 理学 ) 高村 匡広、飛行時間測定器 Multi-gap Resistive Plate Chamber(MRPC) の開発 ; 信号誘起パッド形状変更による高周波特性と耐雑音特性の改善
3. 物理学類・学士 ( 理学 ) 田所 賢一、LHC-ALICE 実験 Si-W 型電磁力カリメータ実証機に向けた APV25 搭載 front-end 読み出しシステムの評価
4. 物理学類・学士 ( 理学 ) 中川 果南、LHC-ALICE 実験 O2 計画におけるシリコン飛跡検出器のためのマルチスレッド処理による飛跡再構成アルゴリズムの高速化
5. 物理学類・学士 ( 理学 ) 畠山 みな、LHC-ALICE 実験 超前方電磁力カリメータ開発に向けた Si-PAD 検出器用プリアンプ試作機の製作とその性能評価
6. 物理学類・学士 ( 理学 ) 星 有輝子、MCP-PMT を用いた高時間分解能クォーツチェレンコフ検出器のビームテスト実験による性能評価
7. 物理学類・学士 ( 理学 ) 落合悠太 ( Yuta Ochiai ) , 宇宙線生成核種  $^{36}\text{Cl}$  降下フラックスの変動評価, Evaluation of temporal variation of cosmogenic  $^{36}\text{Cl}$  flux

#### < 国際会議 ( 招待講演 ) >

1. A. Ozawa, “ Rare-RI Ring in RIKEN RI Beam Factory ” China-Japan collaboration workshop on “ Nuclear mass and life for unravelling mysteries of r-process ” 2017, 6/26-28, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan
2. A. Ozawa, “ Past and future of Rare-RI Ring ”, The 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings (STORI ' 17), 2017, 11/13-18, Kanazawa theater, Kanazawa, Japan
3. T. Yamaguchi, “ Storage-ring mass spectrometry of exotic nuclei ” , International symposium on RI beam physics in the 21st century: 10th anniversary of RIBF, RIKEN, Wako, Japan, 4-5 Dec., 2017.
4. T. Yamaguchi, “ ILIMA project: isomeric beams, lifetimes and masses at the FAIR storage rings ” , 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings, Kanazawa, Japan, 13-18 Nov., 2017.
5. T. Yamaguchi, “ ILIMA status report ” , NUSTAR week 2017, Jozef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia, 25-29 Sep., 2017.
6. Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Seiji Hosoya, Kenta Takano, Yuta Ochiai, Maki Honda, Yuki Ohta, Aya Sakaguchi, Tetsuya Matsunaka, Hongtao Shen and Keisuke Sueki, Progress in Multi-nuclide AMS for the 6 MV AMS System at the University of Tsukuba, The 7th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 7), Guangxi Normal University, Guilin, China, November 20th to 25th 2017.
7. S. Esumi, “Recent Flow Results in d+Au Collisions from Beam Energy Scan at RHIC-PHENIX”, CPOD2017 Critical Point and Onset of Deconfinement, Stony Brook Univ., New York, USA, 7-11/Aug/2017
8. S. Esumi, “Unfolding of net-distribution to look for a critical fluctuation”, Phases of QCD and Beam Energy Scan Program With Heavy Ion Collisions, Fudan Univ, Shanghai, China, 15-18/Aug/2017

9. S. Esumi, "Unfolding the unknown net-distribution with volume fluctuation", EMMI workshop, Wuhan, China, 10-14/Sep/2017
10. T. Nonaka, "Correction methods for detector effects on cumulants", EMMI workshop, Wuhan, China, 10-14/Sep/2017

#### < 国際会議発表 >

1. T. Moriguchi et al., Lamb-shift Polarized Ion Source at UTTAC, The 2017 International Workshop on Polarized Sources, Targets & Polarimetry(PSTP2017), KAIST Munji Campus, Dajeon, Republic of Korea, Oct 16-20, 2017
2. S. Suzuki, Performance of time-of-flight detector and demonstration of completely new position detector for mass measurements with the Rare-RI Ring, 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings (STORI ' 17), Kanazawa, Japan, 13- 18 November 2017.
3. M. Mukai, Beta-ray detector in KISS, The inaugural symposium of the Tomonaga Center of the History of the Universe, University of Tsukuba, Mar. 26-27, 2018.
4. Kimikazu Sasa, Seiji Hosoya, Tetsuya Matsunaka, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Hangtao Shen, Yasuji Oura, Keisuke Sueki, Isobar separation techniques of  $^{41}\text{Ca}$  AMS with the 6 MV tandem accelerator, The Fourteenth International AMS Conference (AMS14), Ottawa (Canada), August 14-18, 2017.
5. Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Tetsuya Matsunaka, Seiji Hosoya, Masumi Matsumura, Shen Hangtao, Maki Honda, Aya Sakaguchi, Keisuke Sueki, Mark Stodola, Mark Sundquist, Performance of the 6 MV multi-nuclide AMS system at the University of Tsukuba, The Fourteenth International AMS Conference (AMS14), Ottawa (Canada), August 14-18, 2017.
6. Seiji HOSOYA, Kimikazu SASA, Tsutomu TAKAHASHI, Tetsuya MATSUNAKA, Masumi MATSUMURA, Hongtao SHEN, Keisuke SUEKI, Isobar suppression for  $^{36}\text{Cl}$ -AMS with the 6 MV tandem accelerator, The Fourteenth International AMS Conference (AMS14), Ottawa (Canada), August 14-18, 2017.
7. Hongtao SHEN, Kimikazu SASA, Ming HE, Baojian HUANG, Masumi MATSUMURA, Seiji HOSOYA, Tetsuya MASUNAKA, Tsutomu TAKAHASHI, Maki HONDA, Keisuke SUEKI, Qingzhang ZHAO, Qi MENG, Kejun DONG, Xiaoming WANG, Yijun PANG, Xianlin YANG, Xiangdong RUAN, Shan JIANG, Study on Multiple radionuclides for Exposure Age Dating of Chinese Tiankeng, The Fourteenth International AMS Conference (AMS14), Ottawa (Canada), August 14-18, 2017.
8. Seiji Hosoya, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Maki Honda, Yukihiro Satou, Kenta Takano, Yuta Ochiai, Koji Yamaguchi, Keisuke Sueki, Calcium-41 and Strontium-90 measurements with 6MV AMS, The 7th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 7), Guangxi Normal University, Guilin, China, November 20th to 25th 2017.
9. Hongtao Shen, Kimikazu Sasa, Qi Meng, Masumi Matsumura, Tetsuya Masunaka, Tsutomu Takahashi, Seiji Hosoya, Keisuke Sueki, Ming He, Baojian Huang, Qingzhang Zhao, Kejun, Dong, Xiangdong Ruan, Jiang Shan, Study on  $^{36}\text{Cl}$  for Exposure Age Dating of Chinese Tiankeng, The 7th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 7), Guangxi Normal University, Guilin, China, November 20th to 25th 2017.

10. Yuta Ochiai, Kimikazu Sasa, Yuki Tosaki, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Satomi Abe, Seiji Hosoya, Kenta Takano, Yuki Ohta, Keisuke Sueki, Correlation between the  $^{36}\text{Cl}$  deposition flux and solar activity, The 7th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 7), Guangxi Normal University, Guilin, China, November 20th to 25th 2017.
11. Kenta Takano, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Yuki Tosaki, Yuki Ota, Seiji Hosoya, Yuta Ochiai, Keisuke Sueki, Kazuho Horiuchi,  $^{36}\text{Cl}$  record in the Antarctic ice core around the cosmic-ray event of 5480 BC and improved  $^{36}\text{Cl}$  AMS at the University of Tsukuba, The 7th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 7), Guangxi Normal University, Guilin, China, November 20th to 25th 2017.
12. T. Nonaka, Measurement of the sixth order cumulant of net-proton multiplicity distribution in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}}=200\text{GeV}$  from the STAR experiment, WPCF2017, Nikhef, Amsterdam, Netherlands, 12-16/June/2017
13. N. Tanaka, Azimuthally differential pion femtoscopy with respect to second and third order event planes and event shape engineering in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76\text{ TeV}$ , WPCF2017, Nikhef, Amsterdam, Netherlands, 12-16/June/2017
14. Y. Kawamura, A Si-PAD and Tungsten based electromagnetic calorimeter for the forward direct photon measurement at LHC, TIPP2017 International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017, Beijing, China, 21-26/May/2017
15. S. Sakai, Measurement of heavy-flavour production, correlations and jets with ALICE, SQM2017 Strangeness in Quark Matter 2017, Utrecht, Netherlands, 10-17/July/2017

#### < 国内会議発表（招待講演） >

1. 笹公和、「加速器質量分析法（AMS）による極微量放射性核種の高感度分析手の開発」、京都大学原子炉実験所専門研究会「放射化分析及び中性子を用いた地球化学的研究 -1-」、京都大学原子炉実験所（大阪府熊取市）2018年1月10日（水）
2. 笹公和、「タンデム・静電加速器を用いた先端研究の現状と将来展望 第30回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」を記念して」、第30回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」セラトピア土岐、岐阜県土岐市、日本原子力研究開発機構東濃地科学センター、2017年7月6-7日
3. 小沢顕、不安定核の質量測定、第61回放射化学討論会 核化学分科会、2017, 9/7, 筑波大学
4. 中込宇宙、フローのまとめ、第33回 Heavy Ion Cafe 並びに第23回 Heavy Ion Pub 合同研究会、2017年4月8日（土）、名古屋大学 ES 総合館 6 階
5. 渡辺陽介、重クオークのまとめ、第33回 Heavy Ion Cafe 並びに第23回 Heavy Ion Pub 合同研究会、2017年4月8日（土）、名古屋大学 ES 総合館 6 階
6. 坂井真吾、ジェットのまとめ、第33回 Heavy Ion Cafe 並びに第23回 Heavy Ion Pub 合同研究会、2017年4月8日（土）、名古屋大学 ES 総合館 6 階
7. 渡辺陽介、高エネルギー重イオン衝突実験の現状と展望、シンポジウム「高エネルギー重イオン衝突実験と諸分野の協奏と発展」日本物理学会第73回年次大会、東京理科大学（野田キャンパス）2018年3月22日（木）～25日（日）
8. 江角晋一、「Status of Beam-Energy-Scan at RHIC」、J-PARC Heavy-Ion Physics meeting, 11/Sep/2017, Tokai, Japan

## < 国内会議発表 >

1. 笹 公和, 細谷青児, 本多真紀, 高橋 努, 佐藤志彦, 高野健太, 落合悠太, 末木啓介, 加速器質量分析法によるストロンチウム 90 の迅速定量法の開発, 日本原子力学会「2018 年春の年会」, 大阪大学吹田キャンパス (大阪市), 2018 年 3 月 26 日 28 日.
2. 森口哲朗, 筑波大学タンデム加速器施設 UTTAC の現状(2016 年度) 第 30 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター(岐阜県) 2017/07/06-07
3. 森口哲朗, 偏極陽子ビームを用いた陽子吸収反応による不安定核の核偏極、日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15
4. 森口哲朗, 固体水素標的を用いた不安定核のスキン厚導出手法の開発、H28 年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会、ホテルポートプラザ千葉、2017/04/17-18
5. 鈴木伸司, RI 質量測定用の薄膜を用いた準非破壊的位置検出器の開発、日本物理学会第 73 回年次大会、東京理科大学野田キャンパス、2018 年 3 月 22-25 日.
6. 鈴木伸司, 質量測定用飛行時間検出器の大型実機の開発、日本物理学会秋季大会、宇都宮大学、2017 年 9 月 12-15 日.
7. 向井もも, KISS II: 196-198Ir のレーザー共鳴イオン化核分光筑波、日本物理学会第 73 回年次大会、宇都宮大学、9 月 12 日 ~ 15 日、2017 年
8. 山口貴之、Storage-ring mass spectrometry at GSI/FAIR、日本物理学会 2017 年秋季大会、宇都宮大学 (峰キャンパス) 2017.9.12-15.
9. 森口 哲朗、石井 聡、大島 弘行、高橋 努、田島 義一、大和 良広、関場 大一郎、笹 公和、上殿 明良、筑波大学タンデム加速器施設 UTTAC の現状 (2016 年度) 第 30 回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」、セラトピア土岐、岐阜県土岐市、日本原子力研究開発機構東濃地科学センター、2017 年 7 月 6-7 日
10. 笹 公和、高橋 努、細谷 青児、高野 健太、落合 悠太、松中 哲也、末木 啓介、極微量放射性核種を超高感度で検出可能な 6 MV タンデム加速器質量分析装置の開発、第 14 回日本加速器学会年会、北海道大学、2017 年 8 月 1 日 ~ 3 日 .
11. 笹 公和、石井 聡、大島 弘行、高橋 努、田島 義一、大和 良広、森口 哲朗、上殿 明良、筑波大学タンデム加速器施設の現状報告、第 14 回日本加速器学会年会、北海道大学、2017 年 8 月 1 日 ~ 3 日 .
12. 笹 公和、高橋 努、細谷 青児、高野 健太、落合 悠太、本多 真紀、太田 祐貴、松尾 一樹、松中 哲也、坂口 綾、末木 啓介、6 MV タンデム加速器質量分析装置を用いた長寿命放射性核種の超高感度検出技術の開発、2017 年日本放射化学学会年会・第 61 回放射化学討論会、筑波大学、2017 年 9 月 6 日 ~ 8 日.
13. 落合 悠太、笹 公和、高橋 努、戸崎 裕貴、松村 万寿美、安部 聡美、細谷 青児、高野 健太、末木 啓介、福島第一原子力発電所事故前後における降水中の塩素 36 同位体比変動、2017 年日本放射化学学会年会・第 61 回放射化学討論会、筑波大学、2017 年 9 月 6 日 ~ 8 日.
14. 細谷 青児、笹 公和、高橋 努、本多 真紀、佐藤 志彦、高野 健太、落合 悠太、末木 啓介、加速器質量分析法を用いた  $^{90}\text{Sr}$  測定の試み、2017 年日本放射化学学会年会・第 61 回放射化学討論会、筑波大学、2017 年 9 月 6 日 ~ 8 日.
15. 高野 健太、笹 公和、太田 裕貴、高橋 努、細谷 青児、落合 悠太、末木 啓介、6MV タンデム加速器質量分析装置における長寿命放射性核種  $^{36}\text{Cl}$  の検出感度の改善、2017 年日本放射化学学会年

会・第 61 回放射化学討論会、筑波大学、2017 年 9 月 6 日～8 日。

16. 笹 公和、山崎明義、石井 聡、黒澤正紀、富田成夫、左高正雄、檜本 洋、工藤 博、構造材料計測用マイクロイオンビーム分析装置によるビーム収束試験と材料組成分析、日本原子力学会「2017 年秋の大会」、北海道大学、2017 年 9 月 13 日～15 日。
17. 笹 公和、高橋 努、松中 哲也、細谷 青児、太田 祐貴、高野 健太、落合 悠太、本多 真紀、末木 啓介、筑波大学 6 MV タンデム加速器質量分析装置による多核種 AMS と応用研究の現状、第 20 回 AMS シンポジウム、セラトピア土岐（岐阜県土岐市）、2017 年 12 月 14 日～15 日。
18. 細谷 青児、笹 公和、高橋 努、本多 真紀、佐藤 志彦、高野 健太、落合 悠太、末木 啓介、6 MV タンデム加速器による 90Sr-AMS、第 20 回 AMS シンポジウム、セラトピア土岐（岐阜県土岐市）、2017 年 12 月 14 日～15 日。
19. 落合悠太、笹公和、戸崎裕貴、高橋努、松村万寿美、本多真紀、細谷青児、高野健太、太田祐貴、末木啓介、つくば市における福島第一原子力発電所事故前後の  $^{36}\text{Cl}$  降下フラックス変動、第 20 回 AMS シンポジウム、セラトピア土岐（岐阜県土岐市）、2017 年 12 月 14 日～15 日。
20. 落合悠太、笹公和、戸崎裕貴、高橋努、松村万寿美、細谷青児、高野健太、太田祐貴、末木啓介、つくば市における  $^{36}\text{Cl}$  降下フラックス変動、第 19 回「環境放射能」研究会、高エネルギー加速器研究機構、2018 年 3 月 13 日～15 日。
21. 笹 公和、アイスコア中の宇宙線生成核種  $\text{Cl-}^{36}$  の測定 - 宇宙線強度変動および環境変動と年代の指標として、研究集会「南極ドームふじ氷床深層アイスコアの解析による気候・環境変動の研究の新展開」、国立極地研究所 3 F 多目的会議室、2018 年 3 月 28 - 29 日。
22. 加藤浩樹、飛行時間測定器 Multi-gap Resistive Plate Chamber; 陽電子ビームを用いた読み出しパッド形状の最適化に向けた性能評価、日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15
23. 市沢太地、飛行時間測定器 Multi-gap Resistive Plate Chamber(MRPC) の開発; J-PARC 実験に向けた  $30 \times 20\text{cm}^2$  大型試作機の性能評価、日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15
24. 川名大地、ALICE 実験 陽子 - 鉛衝突における単電子測定法を用いた重クォークの測定、日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15
25. 青山遼、RHIC-STAR 実験金 + 金衝突における 2 粒子相関の反応領域の幾何学形状に対する依存性の研究、日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15
26. 杉浦哲郎、RHIC-STAR 実験金 + 金衝突における粒子種に依存した efficiency 補正を用いた net-charge 揺らぎの解析、日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15
27. 野中俊宏、分布再構成法による高次キュムラント解析、日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15
28. 川村陽太、LHC-ALICE 実験超前方光子測定用新型電磁カロリメーター製作に向けた Si PAD の基礎特性評価、日本物理学会 2017 秋季大会、宇都宮大学峰キャンパス、2017/09/12-15

#### < 科学研究費、外部資金取得状況 >

1. 科学研究費 若手研究 (B)、スキン構造理解のための不安定原子核の陽子及び中性子密度分布の研究、代表（森口哲朗）、3200（千円）、960（千円）
2. 科学研究費 基盤研究 (A) 「多種の長寿命放射性核種を超高感度で検出可能な加速器質量分析法の開発」、研究期間：2015 - 2018 年度、研究経費：直接経費 33,500 千円、間接経費 10,050

- 千円，2017 年度：10,790 千円 (直接経費：8,300 千円、間接経費：2,490 千円)，研究代表者：笹公和，研究分担者：末木啓介、坂口綾、松崎浩之、松四 雄騎、松村宏、國分陽子
3. 科学研究費 基盤研究 (B)「革新的な超伝導分子検出技術の開拓と宇宙における分子進化の精密評価への展開」，研究代表者：浮辺雅宏 (産総研)，研究分担者：笹公和、富田成夫，平成 27 年度～平成 30 年度 13,100 千円，分担金：2017 年度 150 千円
  4. 科学研究費 基盤研究 (B)「高感度顕微分析を実現する高速クラスター 2 次イオン質量分析における照射技術の高度化」，研究代表者：平田浩一 (産総研)，研究分担者：笹公和、富田成夫，分担金：2017 年度 150 千円
  5. 内閣府 SIP (戦略的創造研究プログラム)「革新的構造材料」「構造材料の未活用情報を測定する先端計測技術開発」(研究拠点型)，研究代表者：大久保雅隆 (産業技術総合研究所)，筑波大学機関代表：上殿明良，副代表：笹 公和、事業参加者：12，平成 26 年度～平成 30 年度 配分経費：250,000 千円，分担金：2017 年度 28,000 千円
  6. 科学研究費 基盤研究 (B)「Di-Jet 識別装置を用いたグルオン衝撃波の探索」研究代表者：三明康郎、4,160 千円
  7. 科学研究費 基盤研究 (A)「ALICE 実験ジェットと前方光子で探る高温クォーク物質生成の起源」研究代表者：中條達也、9,490 千円
  8. 科学研究費 挑戦的萌芽研究「高エネルギー実験のための 10 ピコ秒 飛行時間測定器の開発」研究代表者：中條達也、438 千円
  9. 日仏素粒子物理学研究”Measurements of Jets and Photons in Heavy Ion Collisions at the Highest Beam Energy during the LHC-Run 2 by ALICE”、研究代表者：中條達也、500 千円
  10. 日米科学技術協力事業「相対論的重イオン加速器を用いたクォーク・グルーオン・プラズマと QCD 相図の研究」研究代表者：江角晋一、5,200 千円
  11. 伊藤科学振興会研究助成「原子核衝突ビームエネルギー走査による高密度クォーク核物質の研究」研究代表者：江角晋一、1,000 千円